

デジタル画像によるトマト花色の簡易評価と生育診断利用の可能性

樋江井清隆¹⁾・恒川靖弘²⁾・小川理恵¹⁾・大川浩司¹⁾

摘要: トマトの生育診断に資するため、画像による花色の数値評価について検討した。自然光下でデジタルカメラを用いて色見本及び開花花房を同一画面に写し込み、画像解析用ソフトで色計測した。花冠向軸面の色計測値と色見本の色計測値との差分(Δ 値)を算出し、色見本に対する相対値で花色を評価した。画像による色計測値に及ぼす天候、遮光、撮影時刻の影響について検討した結果、雨天時に撮影し、 $L^*a^*b^*$ 色空間の a^* 、 b^* 及び C^* 値を用いることにより、計測値のばらつきが小さく抑えられた。カメラ6機種で色計測値を比較した結果、機種間で差異が認められた。花色評価した花房について、その後の着果程度と照合した結果、着果程度と花色(Δa^* 、 Δb^* 及び ΔC^* 値)との間に有意な相関が認められた。以上のことから、生育診断のための花色評価の有用性が示唆された。

キーワード: デジタル画像、トマト、花色、生育診断、自然光

An Attempt to Simplify Tomato Flower Color Evaluation Using Digital Images and the Feasibility for Growth Diagnosis

HIEI Kiyotaka, TSUNEKAWA Yasuhiro, OGAWA Rie and OHKAWA Hiroshi

Abstract: We quantified the tomato flower color using digital images to contribute to the growth diagnosis. Using digital cameras under natural light conditions, a tomato flowering cluster and color scale were shown on the same screen. Color values were measured using image-processing software. The difference between measured color values of the abaxial corolla surface and those of the scale were calculated and defined as “ Δ values.” The flower color was numerically evaluated relative to the scale. The influences of weather, shading, and capture time on color measurements were tested. Consequently, rainy conditions and the use of a^* , b^* , and C^* values in the $L^*a^*b^*$ color space as evaluation items kept the variance of measurement the lowest. Images were acquired using six types of digital camera and the evaluated flower colors were compared. The values varied among the six types. As a result of collating the flower cluster color measurements with the subsequent fruit set conditions, significant correlations were found between the fruit set and flower color (Δa^* , Δb^* , and ΔC^* values) of the corolla. Thus, applicability of the flower color evaluation to growth diagnosis was suggested.

Key Words: Digital images, Tomato, Flower color, Growth diagnosis, Natural light

本研究の一部は園芸学会平成31年度春季大会(2019年3月)において発表した。

¹⁾ 園芸研究部 ²⁾ 園芸研究部(現農業経営課)

(2021.9.8受理)

緒言

トマトの生産現場では、生育診断の指標として茎径、茎伸長量、葉面積、開花花房の位置等が有効であることは広く知られているが¹⁾、葉色及び花色についても補助的な指標とされることがある^{2,3)}。愛知県内でも意欲的な生産者及び普及指導員等は、これら生育診断項目について、ノギス及びメジャー等による計測又は肉眼観察を定期的に行い、栽培管理に役立てようとしている。

農作物の色調は、代謝物質である生体色素に由来するため、その色調が現れるまでに至った栄養状態又は栽培条件等の情報を反映しているとされる⁴⁾。ただ、生育診断の指標として、茎葉の大きさは手作業による計測又は画像計測により比較的容易に定量化できるが、色調のような外観形質を客観的かつ定量的に評価することは難しい⁵⁾。植物体の表面は平面でなく単一色でもないため分光測色計、色彩計又は色差計の利用に適さず、その代替技術として画像解析が有効とされる⁶⁾。野外利用を想定した画像解析による植物体の色計測は、特に水稻の研究で先行しており、葉色による栄養診断への応用が期待されている⁶⁻¹⁰⁾。このほか、メロン、コマツナ及び草花類の葉色でも画像計測による生育診断利用の試みが報告されている¹¹⁻¹³⁾。これらの多くは、繊細なカメラ操作(露出、シャッタースピード、ISO感度等の調整、標準光源による色見本撮影)及び複雑な画像処理(ホワイトバランス、トーンカーブの調整、色相角の回転等)を駆使した色補正技術をそれぞれ提案し、変化しやすい自然光に対処している。しかし、このような高度な色補正技術を直ちに生産現場で導入するのは容易でない。

トマトの生育診断を目的とした色評価の研究では、葉色について、葉緑素計(SPAD)又は肉眼観察による数値化¹⁴⁾、画像解析による数値化¹²⁾の事例が報告されている。一方、花色を数値化した研究は見当たらず、有用性も明らかにされていない。しかし、栄養状態又は温度・光等の生育環境の不良は、花の素質を低下させ、結実を不良にすることが多いため¹⁵⁾、花色を生育診断の参考にする事例が生産現場で散見される¹⁶⁾。そこで、本研究では、生育診断の視点から「植物体の草勢又は過去の生育環境が代謝を介して花色の濃淡に影響を及ぼし、その花色は近未来の着果程度を反映する」と仮説を立てた。そして、花色を指標にした生育診断技術の可

能性を探るため、生産者がデジタルカメラ又はスマートフォン等を用いて取得できる可視画像をもとに、現場利用レベルで花色を数値化する方法について検討した。その結果、着果程度が異なる花房間に花色の差異を検出し、花色と着果程度との間に関連性を見出したので報告する。

材料及び方法

1 共通条件

(1) 供試資機材及び撮影方法

撮影用のカメラには、表1に示したレンズ一体型のコンパクトデジタルカメラ又はスマートフォン内蔵カメラを用いた。色見本には、水稻用の葉色カラースケール(富士平工業株式会社、東京)を用いた。表示色は淡い黄緑色～濃緑色の7段階であるが、この色域内にはトマトの花色を含んでいなかった。そこで色計測には、最も近似した淡い黄緑色部分のみを利用し、この色との相対値として評価した(図1)。色見本を色彩計(NR-12、標準光源D₆₅、日本電色工業株式会社、東京)で計測した結果、L*、a*、b*値は順に57.7、-16.9、41.6であった。

カメラはAUTOモードで使用し、ズーム機能を用いずに距離約30 cmからトマトの花房及び色見本を同一画面に写し込んだ。光源は自然光(ハウス内に透過した太陽光)とした。

(2) 試験場所及び供試トマトの栽培条件

試験場所は、愛知県農業総合試験場内の高軒高ハウス(POフィルム被覆)とした。ハウス内には遮光カーテン(遮光率30%、SLS30ハーモニー、株式会社誠和、栃木)を設置し、撮影時に適宜展張した。

供試したトマトの栽培方式は砂壤土を詰めた隔離床における灌水同時施肥とし、栽植様式は株間20 cm×うね幅180 cmで、1株ごとに振り分けて誘引した。栽培管理及び防除管理は当場の慣行法に準じた。

(3) 画像解析

画像解析にはフリーソフトウェアImageJ1.52s¹⁷⁾を用いた。取得画像をL*a*b*画像に変換した後、図1に示したように解析対象(花冠の向軸面及び色見本)を手動で領域選択し、領域内の平均L*、a*、b*値を計測した。その後、RGB、HSV(HSB)と各種画像に順次変換しながら、それぞれの画像で同領域内における輝度、R、G、B、H、S、Vの各平均値

表1 供試機器の仕様

種別	機器符号	メーカー	機種	有効画素数	撮像素子	開放 F 値
デジタルカメラ ¹⁾	DC1	Olympus	FE-330	約 800 万	1/2.3 型 CCD	3.5
	DC2	Sony	DSC-W830	約 2010 万	1/2.3 型 CCD	3.3
	DC3	Canon	IXY640	約 2020 万	1/2.3 型 CMOS	3.6
スマートフォン ²⁾	SP1	Apple	iPhone8	約 1200 万	1/3.0 型 CMOS	1.8
	SP2	Sharp	SH-01L	約 1200 万	1/2.8 型 CMOS	2.0
	SP3	Sharp	SH-M05	約 1310 万	1/3.0 型 CMOS	2.2

1) レンズ一体型のコンパクトカメラ

2) スマートフォン内蔵カメラ

を計測した(以下、画像計測値)。輝度、RGB、HSVの各値は0～255の範囲(256階調)で数値化された。L*a*b*の各値はRGBの各値をもとにソフトウェア内で演算し、L*は0～100、a*は-86.1～98.3、b*は-107.8～94.5の範囲で数値化された。また、a*及びb*を用いてC*(Chroma)値を次式により算出した¹⁸⁾。結果的に、計測項目は輝度、R、G、B、H、S、V、L*、a*、b*及びC*の11種類とした。

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

花色の評価には、花冠向軸面の色計測値と色見本の色計測値との差分を“Δ値”と定義して用いた。例えば輝度の場合、Δ輝度 = 輝度_花 - 輝度_{色見本}と定義した(輝度_花:花冠向軸面の輝度、輝度_{色見本}:色見本の輝度)。花色評価項目(Δ値)はΔ輝度、ΔR、ΔG、ΔB、ΔH、ΔS、ΔV、ΔL*、Δa*、Δb*及びΔC*の11種類とした。

2 花色の画像計測に及ぼす天候、遮光、撮影時刻の影響(試験1)

供試品種には「桃太郎ヨーク」(タキイ種苗株式会社、京都)を自根で用い、供試作型は半促成栽培(播種2019年12月3日、定植2020年2月3日)とした。画像の取得には表1に示したデジタルカメラDC2を用いた。カメラ及び色見本は、三脚及び実験用スタンドを用いて撮影角度を水平に、撮影方向を西向きに固定した(図2)。色見本は開花花房の下方に配置した。

明るさが異なる撮影環境を作出するため、遮光の有無による遮光処理2水準を設定した。撮影日時は2020年3月9日(晴天)及び3月10日(雨天)の各9時、10時30分、12時、13時30分及び15時とし、撮影時刻ごとに無遮光→有遮光→無遮光→有遮光→無遮光と順次変化させながら処理ごとに3回ずつ、同一撮影日には同一花房を撮影した。なお、両日の撮影対象には、それぞれ異なる株を用いた。各時刻の太陽高度はそれぞれ32°、45°、51°、46°及び33°で、太陽方位は123°、146°、179°、212°及び236°であった(方位例:北0°、東90°、南180°、西270°)。太陽高度及び方位は、計算用Webサイトにより算出した¹⁹⁾。カメラレンズと被写体とを結ぶ直線(以下、カメラ光軸)に対する光源(太陽)の角度は、撮影時刻別に33°、56°、89°、122°及び146°と算出され、鈍角の後二者(13時30分及び15時)は逆光条件であった。画像解析の方法は前述のとおりとし、同一花の同一花冠向軸面を計測して比較した。ハウス内の光環境計測には、日射計(MS-601、英弘精機株式会社、東京)及び照度計(LX-1332D、株式会社カスタム、東京)を用いた。これらの計測位置は、日射計を高さ3 m、照度計を被写体と同じ高さ90 cmとした。

3 花色評価値に及ぼすカメラ機種の影響(試験2)

供試品種及び供試作型は試験1と同様とした。供試カメラとして、表1に示したデジタルカメラ3機種(DC1～3)及びスマートフォン3機種(SP1～3)を用いた。色見本の固定方法、撮影角度・方位等は試験1に準じたが、カメラは手で保持した。撮影日時は2020年3月19日(晴天)の正午とし、遮光カーテンを展張した。試験では、カメラ当たり5回ずつ撮影した。撮影時の太陽高度は54°、太陽方位は180°で、カメラ光軸に対す

る光源の角度は90°であった。画像解析の方法は試験1に準じた。

4 着果程度と花色評価値との関係(試験3)

供試品種には、「りんか409」(株式会社サカタのタネ、横浜)を台木「がんばる根3号」(愛三種苗株式会社、愛知)に接ぎ木して用いた。供試作型は半促成栽培(播種2017年11月14日、接ぎ木12月11日、定植2018年1月19日;播種2018年11月20日、接ぎ木12月15日、定植2019年2月1日)及び抑制栽培(播種2018年6月22日、接ぎ木7月10日、定植7月27日)とした。着果促進のため、いずれの花房にも花房当たり3～5花が開花した時点で4-CPA液剤(トマトーン、石原産業株式会社、大阪)を100倍に希釈して噴霧した。更に着果安定のため、着果を確認後、いずれも果房当たり最多で4果に調整した。

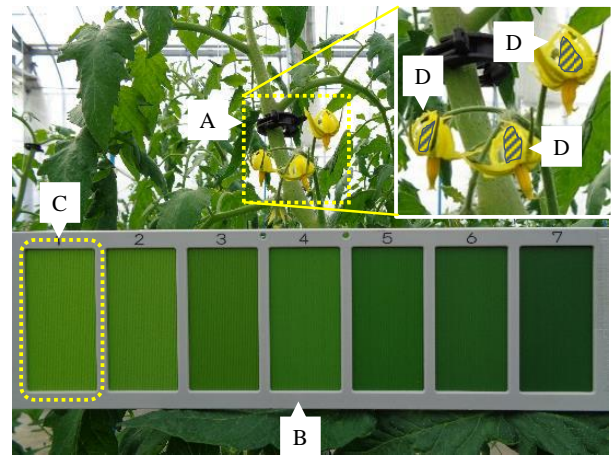


図1 トマト開花花房及び色見本の撮影方法及び色計測対象

右上は開花花房の拡大図を示す

A:開花花房、B:色見本、C:色計測に用いた淡い黄緑色部分(点線内)、D:色計測の対象となる開花1～3日後の花冠向軸面(斜線部は領域選択例)

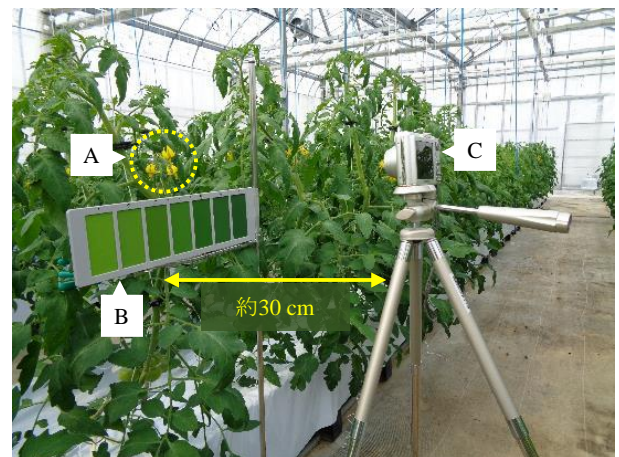


図2 資機材の設置方法(試験1)

A:開花花房、B:色見本、C:デジタルカメラ

調査は、各作型当たり5株を選定し、半促成栽培の第2、4、6花房(3~4月開花)及び抑制栽培の第3、5、6花房(9~10月開花)を対象に実施した。併せて、調査花房について、花房当たり開花数及び摘果前の果房当たり着果数(開花後に直径10 mm以上に肥大した果実数)を記録した。

画像の取得には表1のデジタルカメラDC1を用い、同一花房を開花始めから萎凋(着果又は枯死)まで1~3日ごとに撮影した。撮影方法は、図1に示した構図で色見本と花房とを同一画面に写し込んだ。このとき、撮影者がカメラ及び色見本を手で保持し、カメラ光軸と色見本平面とが直角をなすように撮影した。撮影時刻は毎回9時30分~10時とし、屋外日射量500 W m²以上の光条件では遮光カーテンを展張した。太陽と被写体との位置関係は、常に順光、横光又は斜光とし、逆光を避けた。試験3の画像データには、晴天(有遮光)、曇天、雨天で取得したものが含まれる。

最初に花色評価値の経日変化を検討するため、2018年作の半促成栽培の第6花房における各花房の開花始めから着果又は落花までの画像データを解析した。調査対象は前述の5株で、1花房当たり2花(計10花)とした。次に着果程度との関係を検討するため、同一花房内に着生した5~11花のうち、開花1~3日後の花を2花選定し、色計測に供した。選定した花は、同一花房内で花冠向軸面が大きく写り、かつ開花日が異なる2花で、2花の平均値を当該花房の代表値とした。結果的に、収集した画像データの中から全30花房当たり60画像(=60花)を解析に用いた。

試験結果

1 花色の画像計測に及ぼす天候、遮光、撮影時刻の影響(試験1)

(1) 撮影時の光環境

各撮影時におけるハウス内の日射量及び水平照度を図3及び表2に示した。天候が異なる両日の日射量は、顕著に異なった。晴天の3月9日は、214~546 W m²の範囲で経時変化したが、雨天の3月10日は、10時30分を除いて、時刻にかかわらず30 W m²前後で推移した。遮光処理別の水平照度は、無遮光下で3月9日に20.8~52.5 klx、3月10日に2.5~17.5 klxであった。有遮光下における水平照度の平均値は、無遮光下に対して3月9日では59%、3月10日では45%に相当した。

(2) 画像による花冠向軸面及び色見本の色計測値

花冠向軸面及び色見本について、撮影時刻に伴う色計測値の変化を図4に示した。雨天では、撮影時刻ごとにプロットされた花及び色見本の折れ線は、計測項目Bを除いて同様な勾配・形状を示し、概ね平行であった。一方、晴天では、H、a*、b*及びC*で概ね平行な折れ線がみられたものの、このような関係を示す計測項目は雨天に比べて少なかった。

(3) 撮影条件の変化に伴う花冠向軸面及び色見本の色計測値変化

花冠向軸面及び色見本の色計測値について、両計測値の関係を詳細に検討するため、色見本の色計測値を説明変数(X)とし、花冠向軸面の色計測値を目的変数(Y)とする直線(Y=aX+b)で回帰分析した。計算には、天候別及び遮光条件別にそれぞれ9~15時の計測値(n=5)を用いた。表3には、算出された回帰係数(傾きa)、そのP値及び決定係数(R²)を示した。この回帰式では、傾きaが1に近いほど、花冠向軸面と色見本の計測値が撮影時刻(=光源の位置変化)に伴って等しい量で変化しやすい関係にあることを意味する。すべての撮影条件で傾きaが1に近く(0.8<a<1.2)、かつ統計的に有意(P<0.05)な計測項目はC*であった。次いで、雨天時のa*及びb*もこれに該当した。これらの決定係数は、いずれも0.8以上であった。晴天時のa*及びb*については、有遮光下において傾きaが0.572及び0.770(いずれもP<0.05)と1から乖離し、無遮光下において傾きa=0とする帰無仮説を棄却

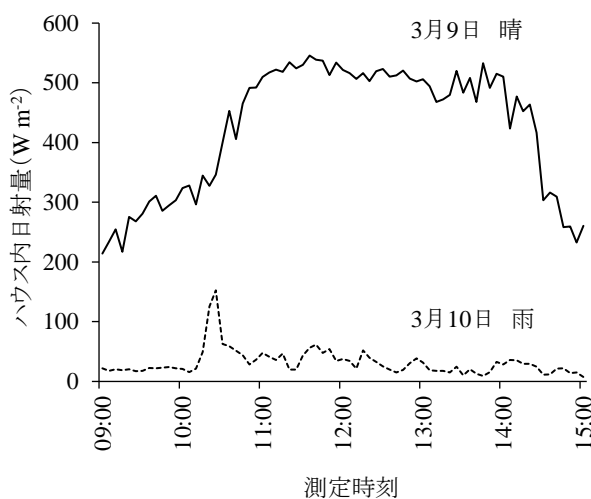


図3 ハウス内の日射量(無遮光)

表2 試験ハウス内における撮影時の照度¹⁾

撮影日	天候	遮光	撮影時刻別の水平照度 (klx)					平均値	指数 ²⁾
			9:00	10:30	12:00	13:30	15:00		
3月9日	晴	無	20.8	26.5	52.5	36.5	31.7	33.6	100
		有	15.7	17.5	26.9	22.3	16.8	19.8	
3月10日	雨	無	6.0	17.5	5.5	4.2	2.5	7.2	100
		有	3.1	7.0	2.4	2.0	1.3	3.2	

1) 施設内通路部の高さ90 cmで測定
2) 無遮光下の平均値を100とした対比

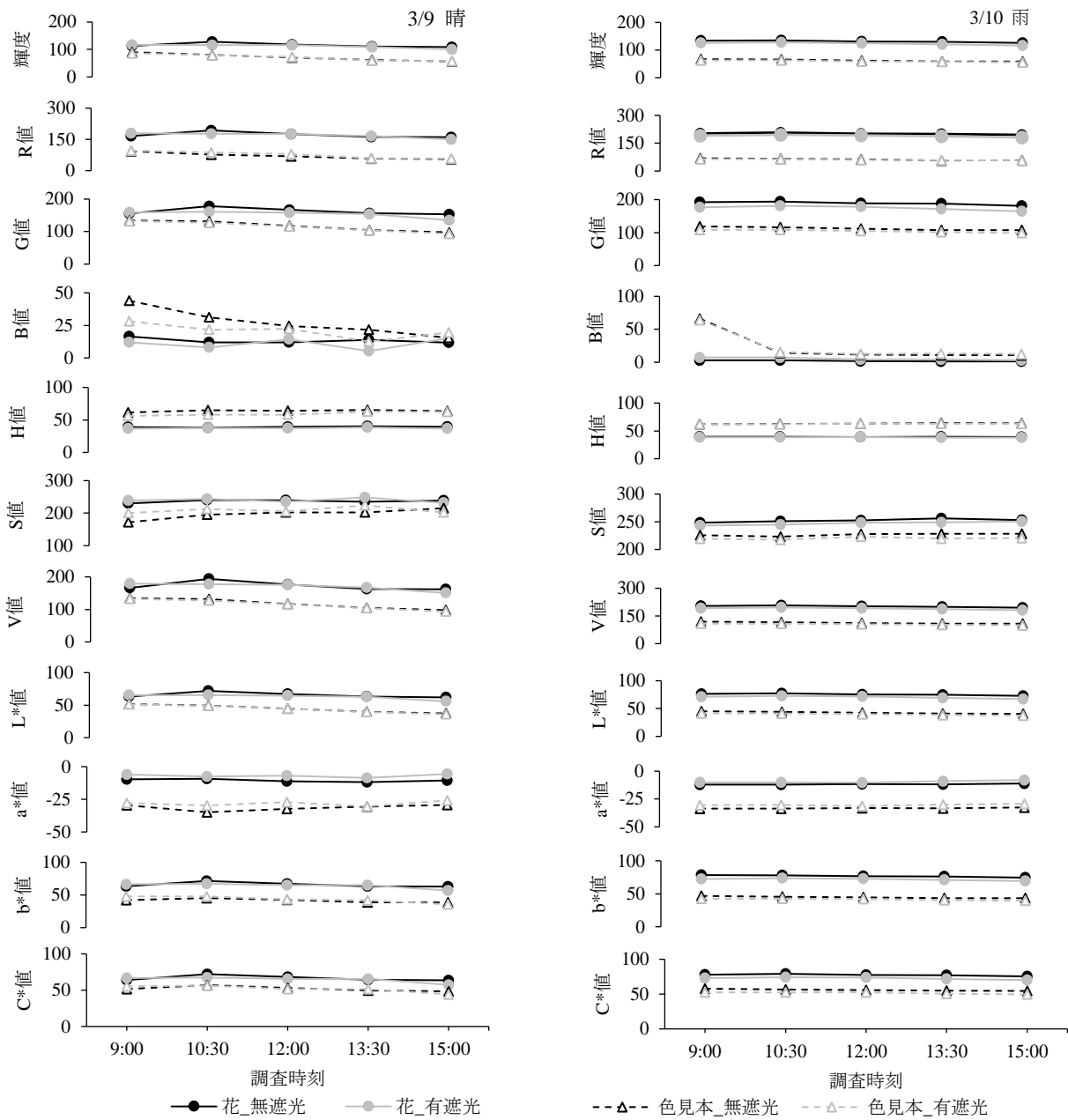


図4 画像による色計測値に及ぼす天候、遮光、撮影時刻の影響¹⁾

1) 花はトマト花冠向軸面とし、有遮光は遮光率30%のカーテンを展張した
3月9日と3月10日では、異なる花を撮影対象とした

できなかった(いずれも $P>0.05$)。従って、以下の試験2及び3では、有望な花色計測項目として a^* 、 b^* 及び C^* について記述した。図5には、検討した11計測項目のうち、輝度及び C^* の散布図例を示した。輝度については、晴天時にデータ点のばらつきが顕著であったものの、 C^* については、天候及び遮光にかかわらずデータ点と同程度の傾きを有する平行な直線状に列した。

(4) 画像計測及び色彩計による色見本の色計測値の比較

画像計測及び色彩計による色見本の色計測値を図6に示した。画像計測値については、異なる撮影時刻及び遮光条件を合算し、天候別に平均値及び標準偏差を算出したが、

いずれの計測項目も天候間に有意差は認められなかった。ただし、 b^* を除いて計測方法の違いによる差異は明瞭であった。

2 花色の画像計測に及ぼすカメラ機種の影響(試験2)

撮影時のハウス内における日射量は 307 W m^{-2} で、水平照度は 25.0 klx であった。供試6機種による色見本の画像計測値及び花色評価値を表4に示した。表中には、試験1で有望視された a^* 、 b^* 及び C^* のみ記載した。画像による色見本の色計測値は、 a^* で $-30.4 \sim -22.3$ 、 b^* で $43.0 \sim 54.2$ 、 C^* で $48.7 \sim 61.5$ と、機種間で差異が認められた。画像による色計測値は、機種にかかわらず、色彩計による色計測値に比べて a^* で

低く、b*及びC*で高い傾向にあった。花色評価値についても、カメラ6機種間で差異が認められた。

3 着果程度と花色評価値との関係(試験3)

調査株の栽植位置及び花房の着生状況により、被写体ごとに撮影の方向、仰俯角は一樣でなかった。

半促成栽培の第6花房における花色評価値(Δa^* 、 Δb^* 及び ΔC^*)の経日変化を図7に示した。調査対象の10花について、開花後日数別に平均値を算出して図示した。 Δb^* 及び ΔC^* は開花4日後から明瞭に変化した。開花5日後の花冠には、明らかな萎凋状態が観察された。

花(果)房当たり開花数、着果数、着果率及び花色評価値を表5に示した。なお、この表では着果率を降順に並べた。開花数については、調査花房間に有意差が認められなかった。一方、着果数及び着果率については、調査花房間に有意差が認められた。着果率は半促成栽培で81.3~100.0%と高く、抑制栽培で7.7~59.6%と低かった。花色評価値については、 Δa^* 、 Δb^* 及び ΔC^* いずれも調査花房間に有意差が認められた。特に果房当たり着果数が0.6果と顕著に少ない花房では、4果以上の花房に比べて、明らかに花冠向軸面の Δa^* が大きく、 Δb^* 及び ΔC^* が小さかった。

これら花色評価値と開花及び着果程度との関係を表6に示した。相関分析の結果、着果数については、 Δb^* 及び ΔC^* と正の相関が、着果率については、 Δa^* と負の相関、 Δb^* 及び ΔC^* と正の相関が認められた。一方、開花数については、 Δa^* 、 Δb^* 及び ΔC^* いずれも有意な相関が認められなかった。

考察

1 花色の画像計測に及ぼす天候、遮光、撮影時刻の影響(試験1)

本研究で検討する花色の簡易評価法は、花の色計測値と色見本の色計測値との差分を用いて花色を数値化するものである。従って、両計測値が撮影条件(光源の位置又は明るさ等)に伴って同程度に変化すれば、撮影条件による影響を受けにくく、再現性が高い評価が可能になるものと推測される。例えば、色見本の色計測値が撮影条件により+1変化したとき、花の色計測値も同様に+1変化すれば、両計測値の差分である Δ 値は撮影条件の影響を受けないことになり、本研究で試みた簡易評価法が成立する。

天候、遮光、撮影時刻が異なる条件において、画像による花及び色見本の色計測値を検討した結果、画像による花及び色見本の色計測値は、計測項目ごとにそれぞれ変化した。これらの要因として、花冠を構成する複雑な曲面と色見本の平滑面とで光の反射の様相が異なることが挙げられる。撮影条件(天候、遮光、撮影時刻)に伴う色見本の変化量が+1のとき、花の変化量が+0.8~+1.2に収まる計測項目は、晴天時のC*、雨天時のa*、b*及びC*であった。これらは、本評価法を効果的に運用するための花色評価項目として有望と考えられた。また、雨天日は晴天日に比べて有効な色計測項目が多く、自然光下における花色評価に好適な天候と考えられた。測色に用いる光源(日光、天空光)の研究では、降

表3 太陽の位置変化に伴うトマト花冠向軸面及び色見本の色計測値の変化¹⁾

計測項目	天候	遮光	傾き ²⁾	P値	R ²
輝度	晴	無	0.257	0.440	0.208
	晴	有	0.500	0.050	0.771
	雨	無	0.806	0.052	0.766
	雨	有	1.399	0.025 * ³⁾	0.852
R	晴	無	0.300	0.581	0.112
	晴	有	0.596	0.059	0.747
	雨	無	0.728	0.124	0.599
	雨	有	1.216	0.089	0.673
G	晴	無	0.357	0.351	0.288
	晴	有	0.580	0.060	0.743
	雨	無	0.836	0.070	0.717
	雨	有	1.443	0.016 *	0.892
B	晴	無	0.137	0.143	0.564
	晴	有	0.400	0.350	0.289
	雨	無	0.022	0.247	0.407
	雨	有	0.055	0.269	0.379
H	晴	無	0.140	0.601	0.102
	晴	有	0.092	0.454	0.197
	雨	無	-0.086	0.501	0.163
	雨	有	-0.121	0.770	0.033
S	晴	無	0.192	0.152	0.549
	晴	有	0.589	0.053	0.762
	雨	無	0.761	0.276	0.371
	雨	有	0.778	0.355	0.284
V	晴	無	0.517	0.278	0.368
	晴	有	0.687	0.023 *	0.862
	雨	無	0.767	0.087	0.677
	雨	有	1.214	0.023 *	0.861
L*	晴	無	0.351	0.360	0.279
	晴	有	0.566	0.053	0.763
	雨	無	0.743	0.078	0.699
	雨	有	1.286	0.020 *	0.872
a*	晴	無	-0.140	0.604	0.100
	晴	有	0.572	0.037 *	0.810
	雨	無	1.116	0.017 *	0.885
	雨	有	1.172	0.016 *	0.890
b*	晴	無	1.187	0.069	0.721
	晴	有	0.770	0.023 *	0.861
	雨	無	1.005	0.032 *	0.829
	雨	有	1.140	0.037 *	0.813
C*	晴	無	1.022	0.015 *	0.895
	晴	有	0.838	0.010 **	0.920
	雨	無	1.127	0.019 *	0.878
	雨	有	1.113	0.019 *	0.875

1) トマト花冠向軸面の色計測値を目的変数とし、色見本の色計測値を説明変数とした回帰分析

Y=aX+b、Y:花冠向軸面の色計測値、X:色見本の色計測値 n=5 (9:00、10:30、12:00、13:30、15:00 の計測値)

2) Y=aX+b の傾き a

3) *: 5%水準で有意、**: 1%水準で有意 (t-検定)

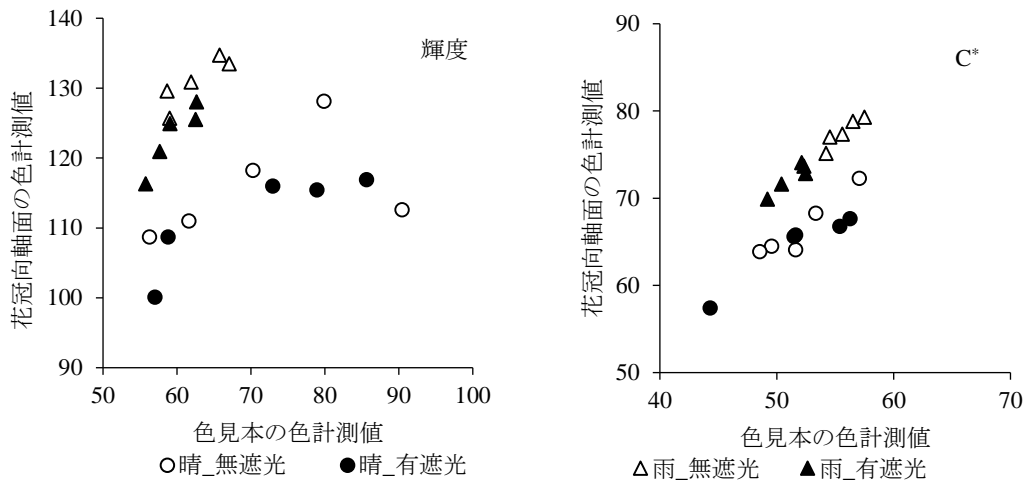


図5 異なる天候又は遮光条件下で取得した画像にみるトマト花冠向軸面及び色見本の色計測値分布¹⁾

1) 晴:3月9日、雨:3月10日、撮影した花は両天候間で異なる

水又は降雪の有無にかかわらず天候を雲量(全天に占める雲の割合)で分類している²⁰⁾。試験1の雨天日は雲量9以上であり、得られた結果は曇りにも適用できるものと思われた。

画像の取得にあたり、特に晴天時の無遮光下では、施設骨材又は隣接株等による局所的な遮蔽、花器の立体構造に起因する日向・日陰部分が混在し、光条件が一樣な画像の取得を困難にした。ただし、有遮光下であっても陰影の発生は十分に抑えられず、曇雨天日と同等な画像は得られなかった。加えて、晴天日の逆光条件(13時30分及び15時)では、花冠が光を透過するために背後の萼片が投影され、花冠に濃淡部分が生じた。一方、色見本は光を透過しないため、逆光条件では顕著に暗く写った。これらが、晴天時の計測値を不安定にした要因と思われる。また、JISの表面色の視感比較方法(Z8723の6)によれば、色比較のためには2 klx以上の照度が必要とされている²¹⁾。雨天時の遮光下では、15時の照度が1.3 klxであったことから、薄暗い曇雨天時の遮光は計測に支障をきたすものと考えられる。また、予備試験において強制発光を伴う撮影も試みたが、供試色見本の表面には光沢があるため、角度によって鏡面反射を起こし、色見本の色計測値が安定しなかった。

以上の結果、撮影条件を曇雨天に限定し、評価項目として a^* 、 b^* 、 C^* を選択することにより、天候又は光源の位置変化が色計測値に及ぼす影響を軽減できるものと推測される。なお、試験2及び3の実施時点では、好適な撮影条件が明らかでなかったため、晴天の有遮光条件でも画像データを収集した。

2 花色の画像計測に及ぼすカメラ機種の影響(試験2)

異なるカメラ(デジタルカメラ又はスマートフォン)では、撮影対象及び撮影条件を揃えても、色計測値間に差異が認められた。これらは、機種ごとに異なる撮像素子、レンズ等、機器固有の光学特性²²⁾に起因するものと考えられる。試験1で検討したように、同一のカメラを用いても画像計測値は撮影条件によるばらつき(誤差)を内包することから、本研究の簡易評価法では、異なる機種間における画像計測値の比較は

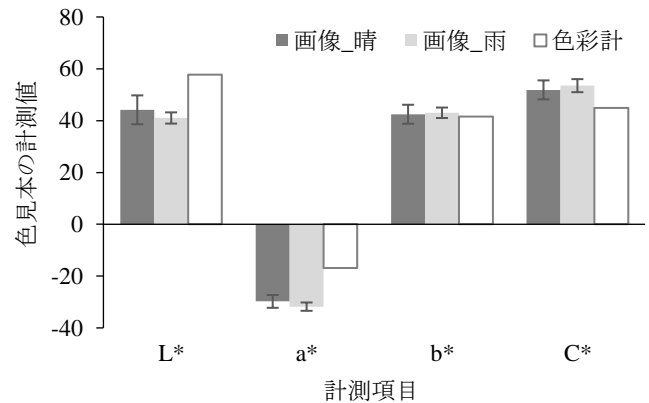


図6 画像計測及び色彩計による色見本の色計測値比較¹⁾

1) エラーバーはSD(異なる時刻、遮光条件を含む、n=10)、画像計測値は、いずれの計測項目も天候間に有意差なし(t-検定)

困難と考えられた。また、色見本について、色彩計(JIS規格に準拠)による色計測値とカメラ6機種による画像計測値とを比較した結果、いずれのカメラも色彩計による計測値との間に差異が認められた。従って、本評価法で得られる花色の数値はカメラ機種ごとに紐づけられた機種固有の値で、JIS規格に準拠した測色値²¹⁾とは異なるものとなった。本評価法は、同一機種で取得した画像データ間であれば時間又は場所にかかわらず数値を比較できるが、他者とのデータ共有時にはカメラ機種の確認が不可欠と考えられる。

3 着果程度と花色評価値との関係(試験3)

試験3では、色計測値が安定しにくい晴天日(有遮光)の画像データを含むものの、花色の経日変化に加えて、着果程度が異なる花房間に花色の差異を検出できた。トマトの花色は開花中にも経日変化する¹⁵⁾。本評価法でも、開花4日後頃から花冠の萎凋又は退色に伴って花色評価値が顕著に変化することを確認しており、本研究では開花1~3日後の開花ステージにある花を評価対象に選定した。花色評価を生育

表4 デジタル画像を用いたトマト花色評価に及ぼすカメラ機種の影響¹⁾

機器 ²⁾ 符号	花冠向軸面の色計測値			色見本の色計測値			花色評価値		
	a*	b*	C* ³⁾	a*	b*	C*	Δa*	Δb*	ΔC*
DC1	-14.7	79.9	81.3	-30.4 c ⁴⁾	47.3 b	56.2 b	15.8 b	32.7 d	25.0 d
DC2	-10.8	79.6	80.4	-29.9 c	45.7 bc	54.6 b	19.2 a	34.0 bc	25.8 bc
DC3	-14.2	78.6	79.9	-26.5 b	45.8 bc	52.9 b	12.3 c	32.8 cd	27.0 cd
SP1	-5.4	80.3	80.5	-22.3 a	47.7 b	52.7 bc	16.9 ab	32.6 d	27.8 d
SP2	-8.3	80.5	80.9	-22.9 a	43.0 c	48.7 c	14.7 bc	37.5 a	32.2 a
SP3	-15.0	88.7	90.0	-29.1 bc	54.2 a	61.5 a	14.1 bc	34.5 b	28.4 b
色彩計	—	—	—	-16.9	41.6	44.9	—	—	—

1) 同一の花を同一の時刻・角度・距離からカメラ1機種当たり5回撮影した平均値

2) DC1~3: デジタルカメラ, SP1~3: スマートフォン内蔵カメラ

3) $C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$ により算出

4) 異なる英字間には TukeyHSD 法により5%水準で有意差あり

診断に用いるには、開花ステージを限定する必要がある。

果房当たり着果数及び着果率と当該花房の花色評価値との間には、有意な相関が認められた。総じて、着果率が高い花房では、花冠向軸面のΔa*が小さく、Δb*及びΔC*が大きい傾向にあった。L*a*b*色空間では、a*軸の正方向は赤紫色、負方向は緑色に、b*軸の正方向は黄色、負方向は青紫色に対応し、C*は色の鮮やかさを表す¹⁸⁾。つまり、花冠の黄色が濃く鮮やかな花房では、着果が良好な傾向にあることを示しており、青木²⁾及び斎藤³⁾の著書にみられる「健全な生育をしている花の色沢は鮮やか」、「適度な栄養状態では花色が濃い」とする記述に符合した。本稿では、花冠向軸面の色と着果程度との間における関係の有無を論じたが、両事象を概観する中で花冠の黄色が濃く鮮やかでありながら着果率が高いとは判断できない花房が観察されるなど、解釈しにくい結果も一部にみられた。各種花色評価値と着果程度との詳細な関係を明らかにするには、更に多様な着果状況にある調査データを多数集めて回帰モデル化する必要があり、今後の課題としたい。なお、着果率が7.7%と著しく低かった花房では、花芽の分化発育期が高温期であったこと、更に初期成長段階で着果負担が加わったこと等の強いストレスに遭遇したものと推察される。

4 野外における色評価に好適な色空間

野外における農作物の色評価に係る先行研究では、RGB色空間^{9,13)}、XYZ色空間⁸⁾、L*a*b*色空間^{7,11,12)}、L*C*h色空間¹²⁾、HSL色空間²³⁾が利用されている。久保田ら¹¹⁾は、RGB色空間について、それぞれのパラメータが明度情報を含んでおり、表面反射等に大きく影響されること、L*a*b*色空間のa*及びb*について、光条件又は同一器官(例えば葉)内の部位による影響を受けにくいことを指摘している。百瀬ら¹²⁾も明るさの情報を除いた色度(a*及びb*)が扱いやすいとし、元永ら⁹⁾も同様の理由からHSL色空間のH及びSが扱いやすいと報じている。このうち前二者の報告は、a*、b*及びC*を有望とみなす本研究の結果を支持した。L*a*b*は均等色空間であり、2色間の差(色差)が、それぞれの色を示す座標間のユークリッ

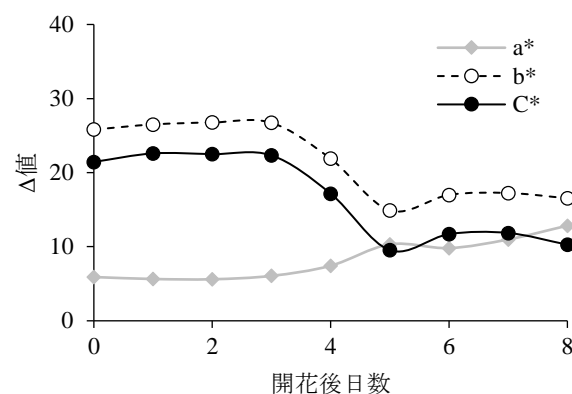


図7 トマト半促成栽培における花色評価値の経日変化¹⁾

1) 開花日の中央値は4月1日(2018年作)

プロットは5~10花の平均値

ド距離として定量的に扱えるように設計されている¹⁸⁾。なお、色計測値どうしの差分を用いる本評価法は、各種色空間を用いながらも、この考え方に立脚している。

5 自然光下における花色評価の現場利用に向けて

本研究の簡易な花色評価法では、厳密な定量こそ困難であったが、花質の良否判別を補助する程度に数値化できたものと思われる。そこで、生産現場での運用を前提に、本評価法の効果的な実践方法を以下に整理した。本評価法では、カメラ及び色見本を固定せずに手で保持するが、図1のように色見本を撮影画面の下端にフレーミングし、色見本の外枠(底辺・横辺)と撮影画面枠とを平行に合わせることで、カメラと色見本との距離、角度を概ね一定に保持できるものと考えられた。また、自然光下で撮影するためには、次に示す①~③の工夫が必要と考える。①天候:曇雨天が望ましい。晴天であれば遮光する。②撮影方向:順光、横光又は斜光とする。逆光では、花冠の背後にある萼片、葉等が投影され、色計測値がばらつきやすい。③撮影時刻:太陽光は、太陽高度に伴って分光分布が変化する²⁴⁾。JISの測色方法に従えば、日の出3時間後~日没3時間前の太陽光の直射を避けた天空光(北空昼光、Z8105の2018)が物体色の色比較

表5 花(果)房当たり開花数及び着果程度と当該花房の花色評価¹⁾

試験 年次	作型	花房 位置	開花日 ²⁾	花(果)房当たり			花色評価値 ³⁾		
				開花数	着果数	着果率(%)	Δa^*	Δb^*	ΔC^*
2019	半促成	2nd	3/15	5.4	5.4 a	100.0 a	7.2 ab	25.1 a	20.1 a
2018	半促成	6th	4/1	6.4	5.4 a	84.4 ab	5.7 b	26.2 a	22.1 a
2019	半促成	4th	4/7	9.6	7.8 a	81.3 ab	7.0 ab	23.6 ab	18.9 ab
2018	抑制	6th	10/13	9.4	5.6 a	59.6 bc	6.7 ab	25.8 a	20.7 a
2018	抑制	5th	10/1	10.8	4.6 a	42.6 c	7.6 ab	21.3 ab	16.2 ab
2018	抑制	3rd	9/8	7.8	0.6 b	7.7 d	8.5 a	18.8 b	13.3 b
一元配置分散分析 ⁴⁾				n.s.	**	**	*	**	**

1) いずれの調査項目も5花房(果房)の平均値を示す

2) 花色を調査した5花房当たり10花の中央値を示す

3) 花冠向軸面の色を数値化

4) **:1%水準で有意差あり、*:5%水準で有意差あり、n.s.:有意差なし(着果率は逆正弦変換後に統計処理)
異なる英字間には TukeyHSD 法により5%水準で有意差あり

に用いる標準の光D₆₅等の代用とされることから²¹⁾、この時間帯での撮影が適切であろう。試験1は太陽高度32~51°の範囲で実施したが、名古屋における正午の太陽高度¹⁹⁾は夏至に78.2°、冬至に31.4°であり、通年では試験範囲から外れる時間帯がある。しかし、JISでは測色用光源とされる天空光について、前述のとおり、日の出後3時間及び日没前3時間の低い太陽高度(例えば夏至で34.0°以下、冬至で25.5°以下)のみ不適と指摘している。従って、この時間帯を除く日中であれば通年で色比較が可能なることから、本評価法も作付け時期を選ばずに適用できるものと考えられる。

トマトの花を対象とした画像解析の研究事例は少なく、着果促進処理の自動化を目的に花領域の抽出が試みられるものの^{25,26)}、前述のように花色の数値化は報じられていない。本研究では、入手しやすく野外使用で実績のある色見本として水稲用カラースケールを便宜的に用いたが、この色域内にトマトの花色を含んでいなかった。そこで、最も近似した淡い黄緑色部分のみを利用した。つまり、1点校正の概念とほぼ同義である。生育診断指標として花色評価に要求される分解能及び精度は明らかでないが、トマトの花色を包含する色域の色見本であれば、多点校正(検量線利用)が可能となり、花色評価の精度向上が期待できる。更に扱いやすい色見本の探索又は開発は今後の課題である。

以上のように、画像による簡易な花色評価を試みた結果、トマトの着果程度と花色評価項目(Δa^* 、 Δb^* 及び ΔC^*)との間に関連性を見出した。従って、花色評価は、着果の不安定化を早期に察知する生育診断指標の一つになる可能性が示唆され、本評価法は生育診断技術の研究開発に資するものと考えられた。

引用文献

1. 柴智徳, 今村俊規, 知識秀裕. ロックウール栽培におけるデータに基づいた植物体管理. 農業技術大系野菜編

表6 トマト花色評価値と開花数及び着果程度との関係¹⁾

調査 項目	相関係数 ²⁾		
	Δa^*	Δb^*	ΔC^*
開花数	-0.024	0.019	0.009
着果数	-0.352	0.407 *	0.451 *
着果率	-0.392 *	0.514 **	0.552 **

1) 花色は花冠向軸面の色を数値化

2) n=30、無相関検定により **:1%水準で有意、*:5%水準で有意

第12巻. 共通技術・先端技術. 農文協. 東京. p.基151-164(2015)

2. 青木宏史. 生育診断と草勢管理. 農業技術大系野菜編第2巻. トマト. 農文協. 東京. p.基391-402(1997)

3. 斎藤隆. 花芽発育の生理, 生態. 農業技術大系野菜編第2巻. トマト. 農文協. 東京. p.基75-94(2015)

4. 亀岡孝治. 農業の現在と未来を考える中でのIT・センシングの有効利用. 情報処理学会研究報告. CVIM-191(11), 1-14(2014)

5. 吉岡洋輔. センシング技術を活用した作物育種における表現型計測の高度化. 計測と制御. 52, 724-729(2013)

6. 元永佳孝. 果実の色計測とその応用. 計測と制御. 52, 718-723(2013)

7. 青木功介, 河尻寛之, 漆畑祐輝, 西原功, 中野慎夫, 杉森史郎. 農作物育成診断のための均等色空間小領域における色補正手法. 画像電子学会誌. 37, 729-738(2008)

8. 千田野風生, 韓東生, 渡邊肇, 高橋能彦. デジタルカメラを利用した水稲群落葉色の評価法. 日作紀. 84, 432-438(2015)

9. 大角雅晴, 中村喜彰, 山崎稔. 画像処理による水稲の葉色測定に関する研究(第3報):水稲群落の葉色値の測定. 農機誌. 58(5), 65-70(1996)

10. 鳥山和伸. 非破壊的手法による作物栄養診断の最前線
1. 水稻:リモートセンシングによる窒素栄養診断. 土肥誌. 80, 66-74(2009)
11. 久保田豊, 位田晴久, 田中豊秀. 画像処理技術を用いた簡易葉色診断システムにおける色データの扱いについて. 園学雑. 65(別1), 394-395(1996)
12. 百瀬博文, 米田和夫, 加藤哲郎. 画像解析法による園芸植物の栄養診断法の可能性. 農耕と園芸. 60(2), 50-52(2005)
13. Okamura, N. K., Kurata, K. and Takakura, T. Analysis of color changes in leaves of muskmelon plants under water stress. *Environ. Control Biol.* 39, 27-34(2001)
14. 北田幹夫, 岡田巖, 福島清, 松本美枝子. トマトの簡易栄養診断に関する研究(第1報):葉中窒素濃度と葉色の関係. 園学北陸支部要旨, 61(1984)
15. 斎藤隆. 開花, 結実の生理, 生態. 農業技術大系野菜編第2巻. トマト. 農文協. 東京. p.基95-114(1984)
16. 和田楓, 小番直樹, 貝塚隆史. トマト栽培温度の変化が生育と花色に及ぼす影響. 園学研. 19別1, 360(2020)
17. アメリカ国立衛生研究所.
<https://imagej.nih.gov/ij/download.html>(2018.3.9参照)
18. 篠田博之, 藤枝一郎. 色彩工学入門. 森北出版. 東京. p.73-124(2007)
19. 国立天文台. <https://eco.mtk.nao.ac.jp/cgi-bin/koyomi/koyomix.cgi>(2020.4.5参照)
20. 関根征士. 昼光の相関色温度(1):主要な変動特性. 照明学会誌. 79(2), 57-65(1995)
21. 日本規格協会. JISハンドブック2003. 61色彩. 日本規格協会. 東京. p.15-514(2003)
22. 米本和也. デジタルカメラの撮像素子. 日本画像学会誌. 46(2), 121-128(2007)
23. Hashimoto, A., Suehara, K. and Kameoka, T. Quantitative evaluation of surface color of tomato fruits cultivated in remote farm using digital camera images. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration.* 5(1), 18-23(2012)
24. Kasajima, I. Measuring plant colors. *Plant Biotechnol.* 36, 63-75(2019)
25. Ting, Y., Kondo, N. and Wei, L. Sunlight fluctuation compensation for tomato flower detection using web camera. *Procedia Engineering.* 29, 4343-4347(2012)
26. Oppenheim, D., Edan, Y. and Shani, G. Detecting tomato flowers in greenhouses using computer vision. *WASET International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering.* 11(1), 104-109(2017)